

**А. А. Кашимбетова\*, Е. Д. Зыкова**

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

\* *k.yaleda@mail.ru*

Научный руководитель – доц., канд. техн. наук *Д. В. Лазуренко*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ TiAl, УПРОЧНЕННОГО ЧАСТИЦАМИ TiC

Данная работа посвящена структурным исследованиям композиционного материала на основе интерметаллида TiAl, упрочненного твердыми карбидными частицами, который был сформирован методом искрового плазменного спекания. Консолидация проводилась в два этапа. Было установлено, что на первом этапе искрового плазменного спекания при температуре 830 °C формируются слоистые композиты с чередующимися слоями титана, триалюминид титана. Расположение частиц TiC носит локальный характер. Последующее спекание при температуре 1250 °C позволило сформировать структуру, состоящую из  $\gamma$  и  $\alpha_2$  фазы. Кроме того, в ходе второго этапа спекания фаза TiC вступила в реакцию с металлическими компонентами композита, образовав соединение  $Ti_2AlC$ .

*Ключевые слова:* интерметаллид, композиционный материал, искровое плазменное спекание.

**A. A. Kashimbetova, E. D. Zyкова**

## INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF TiAl COMPOSITE MATERIALS REINFORCED BY TiC HARD PARTICLES

This work is devoted to investigation of the TiAl-based composite structure reinforced by TiC hard particles and obtained by spark plasma sintering. Consolidation was carried out in two steps. It was found that at the first stage of spark plasma sintering at 830 °C consisted of Ti and  $TiAl_3$ . Distribution of TiC was inhomogeneous. Sintering at 1250 °C allowed fabricating the structure consisted of  $\gamma$  and  $\alpha_2$  phases. Moreover, at this stage TiC reacted with metallic elements and formed  $Ti_2AlC$  compound.

*Keywords:* intermetallic, composite, spark plasma sintering.

**Введение.** В современном авиационном материаловедении существует конкретная и важная задача: разработка новых материалов для деталей авиационных систем преобразования энергии. Перспективными материалами для таких систем являются сплавы на основе TiAl ( $\gamma$ -фаза), поскольку отвечают многим требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления деталей газотурбинных двигателей (например, высокая

рабочая температура, низкий удельный вес). Сплавы такого типа обладают уникальным комплексом физико-механических свойств, включающим в себя высокую прочность, жесткость, коррозионную стойкость, жаропрочность и жаростойкость в сочетании с относительно низкой плотностью [1]. В рамках данной работы рассматривается возможность и эффективность формирования композитов с разнородными слоями, поскольку слоистая структура отличается от монолитных более высоких показателей трещиностойкости и усталостной прочности [2]. Кроме того, введение прослоек твердой фазы способствует повышению прочности и жесткости в определенных направлениях. Цель данной работы – исследование структуры слоистых композиционных материалов на основе TiAl, упрочненных частицами TiC и полученных методом искрового плазменного спекания.

**Материалы и методы.** Для формирования слоистой структуры композита были использованы титановые и алюминиевые фольги марок BT1-0 и A5 соответственно, а также порошок упрочняющей фазы TiC. Предварительно подготовленные фольги были поочередно уложены в титановую форму (внутренний диаметр – 26 мм, внешний диаметр – 28 мм, высота – 5 мм, толщина стенок – 1 мм), на поверхности каждой заготовки из алюминия равномерно распределялся порошок упрочняющей фазы ( $m = 0,052$  г). Сверху форма закрывалась титановой крышкой. Такая конструкция формы позволила избежать вытекания алюминия из зоны реакции, т. к. спекание проводилось при температуре выше его температуры плавления. На рис. 1 представлена схема титановой формы в графитовой пресс-форме.

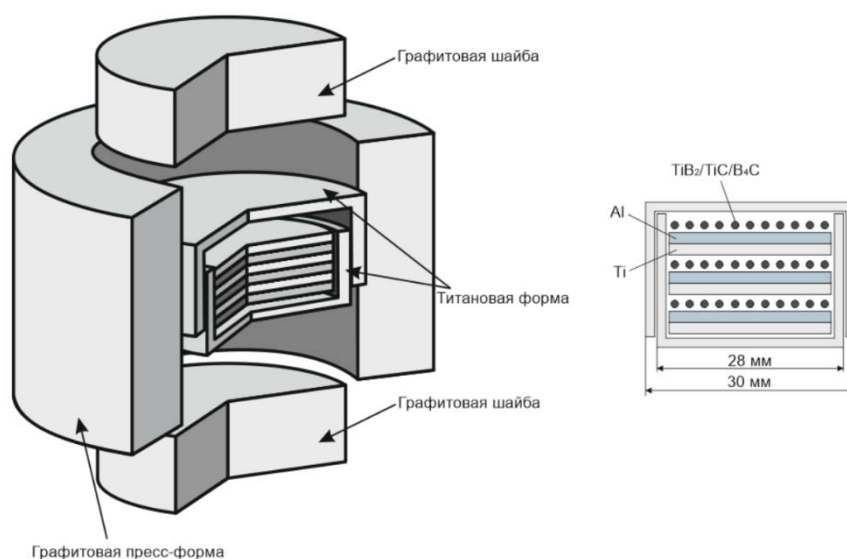


Рис. 1. Схема заполненной титановой формы в графитовой пресс-форме для ИПС

Формирование композитов производилось на установке искрового плазменного спекания (ИПС) LABOX-1575. ИПС образцов

осуществлялось в 2 этапа. Первый этап спекания проводился в течение 10 минут при температуре 830 °С и давлении 40 МПа; второй этап – при температуре 1250 °С и 10 МПа в течение 5 минут.

Структурные исследования материала, в том числе энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭРС), осуществлялись посредством растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP. Для исследования зеренной и субзеренной структуры, а также определения фазового состава границ сопряжения металл-интерметаллид был использован просвечивающий электронный микроскоп FEI Company Tecnai G2 20 TWIN. Кроме того, определение фазового состава осуществлялась в процессе синхротронного исследования на Немецком электронном синхротроне (Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY) PETRA III.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Спекание при температуре 830 °С позволило сформировать слоистый металл-интерметаллидный композит, структура которого представлена чередующимися слоями Ti и  $\text{TiAl}_3$  с прослойками карбидной составляющей (рис. 2, а). На рис. 3, а отчетливо видно, что в образце на границах раздела титана и триалюминид титана расположен тонкий переходный слой. Посредством ЭРС было установлено, что элементный состав слоя соответствует фазам  $\text{TiAl}_2$ ,  $\text{TiAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$  ( $\alpha_2$ -фаза). Образование переходного слоя обусловлено тем, что в ходе спекания весь алюминий был израсходован на формирование  $\text{TiAl}_3$ , но в процессе дальнейшего взаимодействия титана со сформированным триалюминидом титана образовались более богатые титаном соединения.

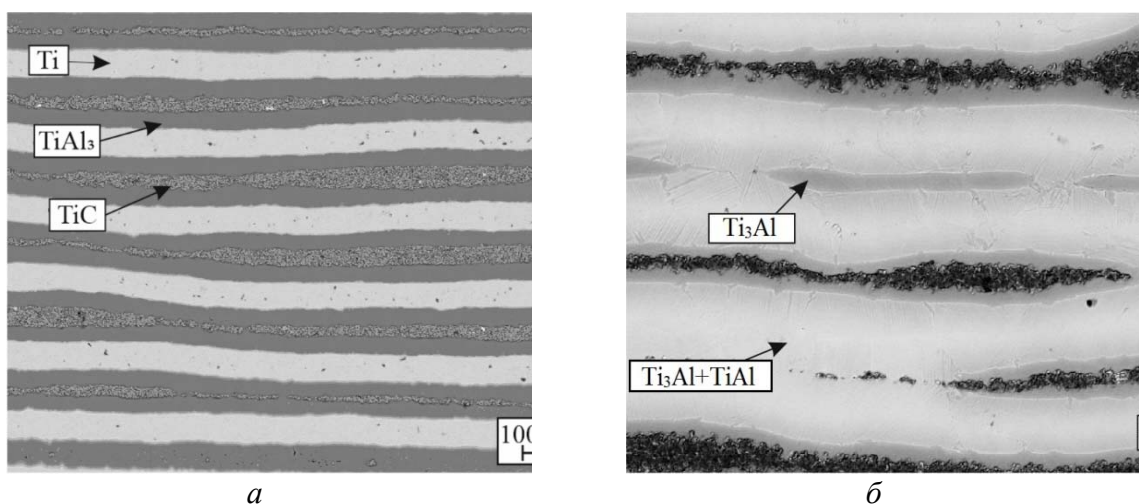


Рис. 2. Микроструктура материала «Ti–Al–TiC» после спекания при:  
а – 830 °С; б – 1250 °С

Второй этап ИПС при температуре 1250 °С был необходим для протекания структурных превращений, которые привели к формированию интерметаллид-керамического слоистого композита (рис. 2, б и 3, б). На

этом этапе была сформирована интерметаллидная структура пластинчатого типа, что характерно для смеси  $\alpha_2$ - и  $\gamma$ -фаз, что также подтверждается результатами ЭРС. На рис. 4 представлены результаты просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для участка с ламельным строением. Морфология карбидных включений также была изменена, поэтому, ссылаясь на исследования зарубежных исследователей [3], можно предположить, что процесс спекания сопровождался протеканием реакции, результатом которой стала перекристаллизация карбидных соединений. Синхротронные исследования позволили выявить, что высокотемпературное спекание привело к формированию карбидной фазы состава  $\text{Ti}_2\text{AlC}$ .

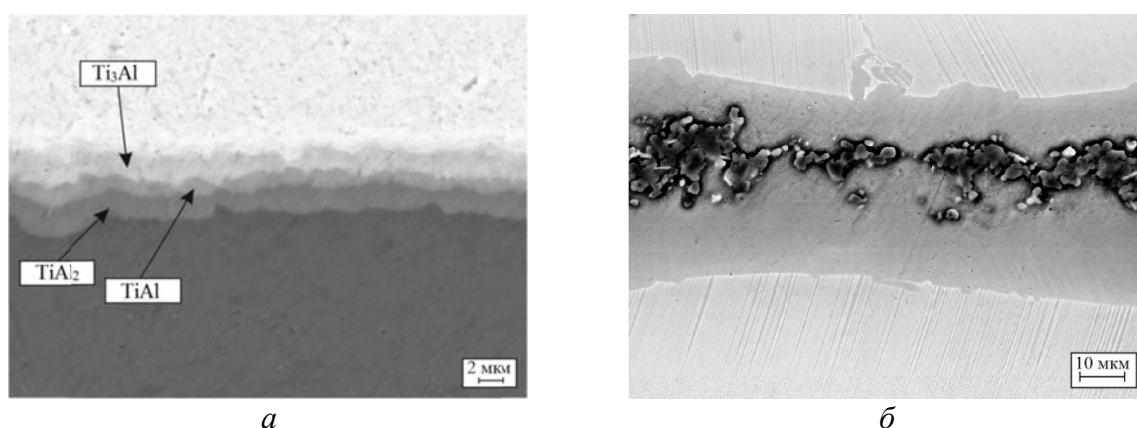


Рис. 3. Граница раздела между слоями после спекания при: *a* – 830 °C; *б* – 1250 °C

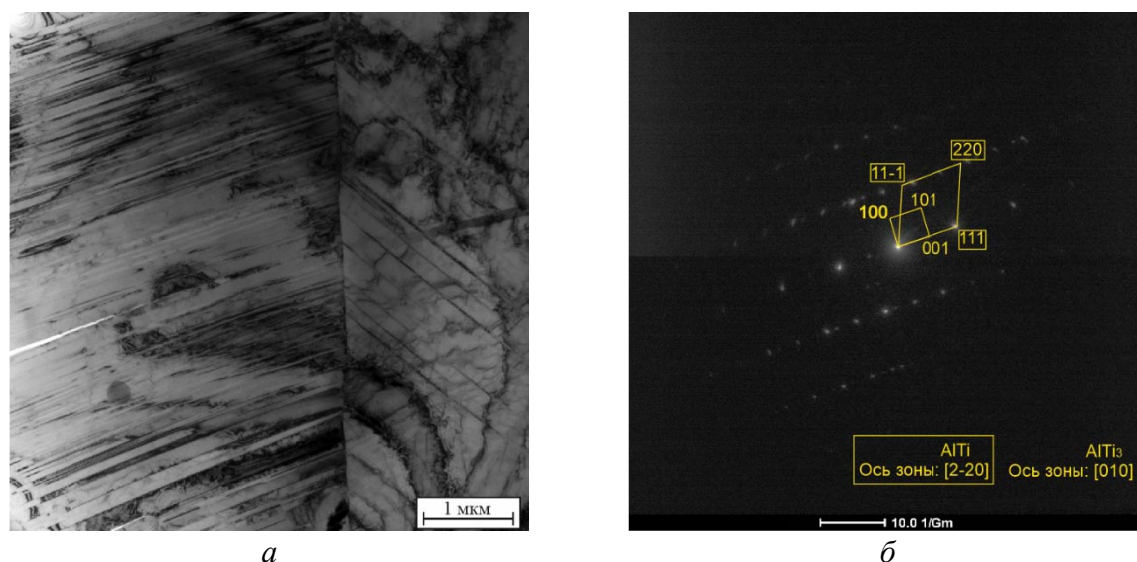


Рис. 4. Результаты ПЭМ: *a* – ламельная структура сплава на основе  $\gamma$ -фазы; *б* – обратная решетка

Кроме того, синхротронные исследования подтвердили предположения о фазовом составе композитов. После ИПС при 830 °C структурными составляющими были: Ti,  $\text{TiAl}_3$  и TiC; ИПС при 1250 °C привел к формированию  $\text{Ti}_3\text{Al}$  и TiAl. Это свидетельствует о том, что в

ходе высокотемпературного нагрева между имеющимися фазами произошла реакция, результатом которой стало формирование необходимой интерметаллидной структуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Appel F. Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology / F. Appel, J. D. H. Paul, M. Oehring // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2011. P. 465–478.
2. Vecchio K. S. Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites / K. S. Vecchio // JOM. Journal of the minerals, metals and materials society. 2005. V. 57 (3). P. 25–31.
3. Improvement in mechanical properties and high temperature oxidation resistance of  $\gamma$ -TiAl intermetallic compounds by boronising / S. Kim [et al.] // Material Science and Technology. 1998. V. 14. P. 435–439.